小型压水堆主参数设计探讨

李东原[1]，徐教珅[1]，洪浩[1]

1（核电安全技术与装备全国重点实验室，中广核工程有限公司，深圳，518172）

摘要 在众多小型模块化反应堆（SMR）类型中，小型模块化压水堆（SMPWR）凭借其成熟的技术基础及灵活的部署能力展现出独特的优势，并在未来核能发展中扮演着越来越重要的角色。本文聚焦于小型模块化压水堆的总体方案及主参数设计，系统总结了堆芯、反应堆冷却剂系统及蒸汽侧参数的设计方法论，并重点探讨了不同堆芯循环方式对总体方案和主参数设计的影响。研究采用理论分析与模拟验证相结合的方法，提出了一种自然循环小型压水堆的主参数设计方案，并通过建模仿真验证了其可行性。本文为小型模块化压水堆的后续研发提供了思路和建议，强调了自然循环设计在安全性与效率方面的优势，可为未来核能技术的发展提供重要参考。

关键词 小型压水堆；主参数设计；强迫循环；自然循环；仿真验证

中图分类号 TL351

Discussion on Main Parameter Design of Small Modular Pressurized Water Reactors

LI Dongyuan[1], XU Jiaoshen[1], HONG Hao[1]

1(*State Key Laboratory of Nuclear Power Safety Technology and Equipment, China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518172, China*)

Abstract **[Background]** Small Modular Reactors (SMRs) are poised to play an increasingly significant role in the future development of nuclear energy. Among various types of SMRs, Small Modular Pressurized Water Reactors (SMPWRs) are emerging as a particularly promising technology due to their well-established operational experience and adaptability to diverse applications. **[Purpose]** This study aims to focus on the overall design scheme and main parameter design of SMPWRs. It systematically summarizes the design methodologies for the reactor core, the reactor coolant system, and the steam-side parameters. **[Methods]** The research employs a comprehensive approach, integrating theoretical analysis and simulation modeling. It proposes a potential main parameter design scheme for a natural circulation SMPWR based on established design methodologies. The feasibility of this design is then validated through simulation modeling. **[Results]** The proposed natural circulation SMPWR design demonstrates a feasible and efficient approach to achieving the desired operational parameters. The simulation results confirm the viability of the design, highlighting its potential for practical application. **[Conclusions]** The proposed design and methodologies can serve as a foundation for further research and development in this promising area of nuclear energy technology.

Key words: Small Modular Pressurized Water Reactors (SMPWRs), Main design parameter; Forced circulation; Natural circulation; Simulation Validation

小型模块化反应堆（Small Modular Reactor，SMR，下文简称小型堆）是指发电功率不超过300兆瓦的核反应堆动力装置。相比于传统的大型商用压水堆，小型堆实现了模块化设计、设备系统模块化预制和现场模块化组装建设，具有厂址适应性高、投资风险低、建设周期短等诸多优势[1]。在安全性方面，小型堆因其结构简单，可以实现多种事故的实际消除；又因其放射性源项小，造成大量放射性泄漏的概率更低。小型堆可以与大型核电互为补充，是未来全球核能的重要发展方向之一。在众多小型堆技术中，小型压水堆因其技术成熟性高、运行经验多、部署能力强等特点，有望成为最早批量化建设的小型堆技术路线[2]。

国内外针对小型压水堆的主参数方案设计已开展了诸多研究。李东朋等[3]针对环形燃料小

第一作者：李东原，男，1993年出生，2018年于中山大学获硕士学位，现从事核电厂总体安全方面研究

通讯作者：徐教珅，xujiaoshen@cgnpc.com.cn

收稿日期：

型压水堆，研究了其堆芯主要参数之间的匹配规律；刘宇生等[4]调研了各国浮动小型堆的典型设计参数，并对海洋条件下小型堆堆芯热工水力的验证能力进行了研究；郝承明等[5]研究了自然循环和强迫循环下压水堆热工水力参数的变化规律。然而，现有研究仅局限于堆芯或反应堆冷却剂系统，对于小型压水堆总体方案的研究相对较少，尤其缺乏对小型压水堆堆芯、主回路及蒸汽侧参数串联设计方案的系统工程研究。

目前国内外的多数小型压水堆的研发仍在进行中，开展对小型压水堆全范围主参数方案的方法论研究，对小型压水堆的研发设计具有重要意义。本文通过总结国内外已研发的小型压水堆的总体技术方案，提出小型压水堆的主参数设计方法论，并就堆芯强迫循环和自然循环主参数设计的区别进行了深入研究。本文可为小型堆的后续发展提供思路与建议。

1 小型堆的主要技术特点

大型压水堆的一回路涉及到蒸汽发生器、主泵、稳压器等大型主设备，设备间依赖主管道的互相连接。相比而言，小型堆堆芯热功率小，可以在压力容器内完成传热循环，便于形成高度集成的一体化反应堆结构。一体化反应堆直接将主设备安装在压力容器内，取消了设备间的连接管道，其简单、紧凑的结构设计可以实现大量设计基准事故的实际消除，在提升电厂的安全性的同时，大大减小了电厂的选址难度和建设成本。

大型压水堆因其堆芯功率大，需要大量的冷却剂带走堆芯热量，因此一回路必须依赖主泵的强迫循环。而小型压水堆的堆芯功率低，理论上可以依赖自然循环带走堆芯热量。自然循环小型压水堆通常由堆芯提供热源，蒸汽发生器提供冷源，依靠热段和冷段中流体密度差所产生的驱动压头来推动冷却剂在闭合的回路中流动。自然循环的建立不依赖于主泵，这会带来诸多好处：其一是可以大幅减少管道和设备数量，从源头消除主泵失效引起的故障；其二是减少核电厂对外界电源的依赖，大大提升电厂在失电状态下的可靠性。另外，自然循环小型压水堆因不需要主泵，更容易实现一体化设计。相比而言，采用强迫循环的一体化压水堆需要布置主泵，完全内置主泵尚需克服高温轴承、高温电磁线圈等技术难题，而外置或插入式主泵都会在主泵布置处产生压力容器与外部设备的贯穿接口，无法完全实现一体化设计。

近年来，很多国家都在致力于研发安全性好、经济竞争力强的小型反应堆，主要用于发电、供热、海水淡化等。国外小型堆主要以 B&W 公司的 mPower 堆型以及 NuScale 公司的 NuScale 堆型等为代表，而我国以中国核工业集团开发的 ACP100 模块式小型压水堆及清华大学设计的 NHR 低温供热堆等为代表[6]。mPower 和 ACP100 采用了堆芯强迫循环的设计方案，NuScale 和 NHR 采用了堆芯自然循环的设计方案，两种方案各有优劣。

2 小型压水堆主参数介绍

主参数是对核电厂运行和安全有重要影响的参数，表征了核电厂在安全性、可运行性、经济性等设计指标上的先进水平。不同型号核电厂的核心差别在于主参数的不同。核电厂主参数可以分为下述四类：

a) 用户需求类参数，此类参数通常根据用户需求或当地法规标准要求确定，可以细分为四个方面：

- 机组性能水平：包括机组额定出力、设计寿命、可用率等；
- 机组安全水平：包括安全地震停堆、堆芯损坏频率、大量放射性释放频率等；
- 机组操控水平：包括操纵员不干预时间、堆芯控制模式等；
- 机组运维水平：包括工作人员集体剂量、放射性固体废物年产生量等。

b) 堆芯参数，此类参数表征核电厂堆芯设计的总体方案，主要包括堆芯热功率、燃料组件类型及数量、线功率密度、堆芯出入口温度、焓升因子等。

c) 主回路参数，此类参数表征核电厂主回路设计的总体方案，主要包括主回路流量、压力、温度等相关参数。

d) 二回路参数，此类参数表征核电厂蒸汽侧设计的总体方案，主要包括蒸汽压力、蒸汽温度、蒸汽流量、蒸汽湿度、给水温度、给水流量等参数。

3 小型压水堆堆芯参数设计

通常情况下，机组的额定出力（电功率）作为最主要的项目研发目标之一，需要最先确定。根据朗肯循环的热效率，可以反推出堆芯热功率值。因为小型压水堆的二次侧温度压力往往低于大型压水堆，很难在二回路设计多级再热，小型压水堆的热效率通常不会高于 35%。

在确定堆芯热功率后，可以对燃料组件的数量和类型做大致判断。截短式燃料棒是小型压水堆最常用的燃料组件类型之一，部分反应堆也会采用盒式等其他类型的燃料组件。因堆芯需采用正方形、1/8 对称布置的方法，单列组建数 N 需要满足“(N^2-1)可以被 8 整除”的条件，表 1 展示了常见的堆芯燃料组件排列方式。

表 1 常见的堆芯燃料组件排列方式

Table 1 Common Arrangement of Core Fuel Assembly

排列方式 Arrangement	总燃料数 Fuel Number	燃料组件数 Assembly Number
7×7	49	37
9×9	81	69
17×17	289	177

小型压水堆的堆芯热功率较低，为了减小压力容器的长度和直径，通常采用截短型燃料组件、7×7 或 9×9 的堆芯燃料排布方式。在确定燃料组件排布方式后，还要结合堆工设计对堆芯线功率密度、焓升因子 $F_{\Delta H}$、热点因子 F_q 等进行迭代计算与复核。

4 小型压水堆主回路热工水力参数设计

主回路热工水力参数设计反映了主回路热工水力特性，其中温度、压力和流量是最关键的参数。表 2 给出了四种代表堆型的部分主回路主参数。

表 2 代表堆型的部分主回路主参数

Table 2 Main Design Parameters of Typical SMRs

型号 Type	mPower	NuScale	ACP100	NHR
堆芯功率 Core power /MW	575	160	385	200
运行压力 Coolant pressure /bar	148	128	150	80
堆芯出口温度 Core outlet temperature/℃	318.9	310	321.2	280
强迫循环/自然循环 Forced circulation (FC)/Natural circulation (NC)	FC	NC	FC	NC
流能比 Flow to power ratio /(g · J^{-1})	~6.2	~3.6	~5.0	~4.2

在堆芯入口温度、出口温度和平均温度三个温度参数中，堆芯出口温度是最高的，也是最制约堆芯热工水力设计的参数。提高堆芯出口温度有利于二回路蒸汽品质的提升，从而提升机组效率，进而提高经济性。目前压水堆的燃料组件多使用锆合金，受锆合金最高耐受温度 350℃的制约，堆芯出口温度往往在 350℃以下，并保留一定的裕量，这个裕量即为堆芯过冷度，在事故工况下可以最大限度限制堆芯沸腾的发生。

堆芯热量需要通过主回路冷却剂向外传导，通常用流能比（堆芯流量与热功率的比值）来表征传递单位热量所需要的冷却剂流量。流能比与堆芯进出口冷却剂的焓差成反比。流能比较小意味着堆芯流量较少，可能导致堆芯带热能力不足，降低了安全性；流能比较大意味着所需的驱动力较大，会提高工程设计及设备选型的难度。因此，流能比的取值应在合理范围内。需要注意的是，流能比的数值也影响堆芯进出口温度。

流能比的取值与主回路的循环方式相关。自然循环因驱动力较弱，流量往往较小，在当前的设备制造水平下流能比很难高于 5 g/J。如采用自然循环方案，需选取合理的冷热温差及高度差，估算主回路流阻，使得主回路自然循环可以成功建立，且流能比在合理的区间内。采用强迫循环时，冷却剂由主泵驱动，可以通过调节主泵出力调整堆芯流量，但过大的流能比会增加主泵负担，降低经济性，因此一般将流能比控制在 5 g/J ~ 8 g/J，这样更有利于平衡安全性和经济性。

5 小型压水堆二回路参数设计

核电厂二回路的主要功能是接收主回路冷却剂传递的热量并产生蒸汽。二回路作为正常运行期间主回路的热阱，需要带走堆芯产生的热量；同时，二回路需要产生高品质蒸汽用于推动汽轮机做功。

制约主蒸汽参数的主要因素有三个，其一是主回路冷却剂的温度，通常主蒸汽温度不会高于作为热源的主回路温度；其二是汽轮发电机组对主蒸汽品质的要求；其三是蒸汽发生器的尺寸和制造水平，因国内公路运输对大型物件的尺寸有严格要求，模块化小堆的蒸汽发生器尺寸会受到限制。此外，电厂往往对主蒸汽有 20℃左右的过热度要求。目前小型压水堆二次侧压力通常不超过 5MPa，主蒸汽温度通常不超过 290℃，主给水温度可根据二者适当选取。当蒸汽发生器选型确定后，根据能量守恒可以计算出二回路的其他参数。

6 自然循环小型堆的主参数设计过程

基于上文提到的设计方法论，本文以 NHR 小型压水堆为参照，提出了一种可能的自然循环小型压水堆主参数设计方案，并进行了仿真分析，以验证方法论的可行性。

在本文提出的方案中，堆芯采用与 NHR 一致的方案，即 9×9 的燃料排布方式，反应堆功率为 200MW，运行压力为 80bar。在设计主回路参数时，首先参考工程经验选取一个比较合适的流能比（本文选取 4.5 g/J 左右），由此可以

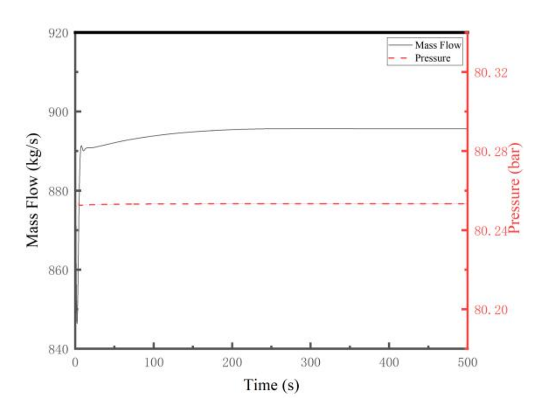
得到堆芯流量在 900 kg/s 左右。因流能比是堆芯出入口焓差的倒数，在主回路压力和平均温度已知的条件下，可由流能比得到堆芯出入口的焓差，进而推导出堆芯出入口的温度。在堆芯出入口高度差已知时，可以进一步得到自然循环的驱动力，若其大于主回路的阻力，则自然循环可以建立。由于二回路参数受蒸汽发生器选型影响较大，需要的假设条件较多且难以一概而论，本文不再进行具体案例分析。

为了验证上述参数在工程设计中的可行性，本文基于 Modelica 建模语言搭建了一个涵盖堆芯及主回路主要部件的热工水力参数分析模型，并进行了稳态仿真。仿真结果证明，在自然循环驱动力大于主回路阻力时，主回路的自然循环可以建立，主回路的压力、流量、温度等主要参数可以达到稳定状态，且与设计值较为接近，具体结果详见表 3。图 1 展示了主要参数随时间变化并达到稳定的过程。仿真结果初步验证了该自然循环小型堆主参数设计方案的可行性。

表 3　主回路参数设计过程和仿真结果

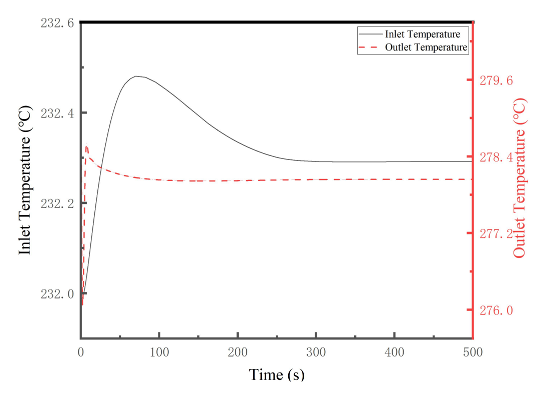
Table 3　Engineering and Modeling of Main Parameters

参数 Parameter	工程推导方法 Engineering derivation	设计值 Design value	仿真值 Simulation result
①堆芯功率 Core power /MW	初始假设 Initial assumption	200	200
②运行压力 Coolant pressure /bar	初始假设 Initial assumption	80	80.25
③流能比 Flow to power ratio /$(g\cdot J^{-1})$	初始假设 Initial assumption	4.5	4.48
④堆芯平均温度 Core average temperature/℃	初始假设 Initial assumption	255	255.16
⑤堆芯质量流量 Flow mass/$(kg\cdot s^{-1})$	由①③推导得出 Derived from ①③	900	895.6
⑥堆芯入口温度 Core inlet temperature/℃	由②③④推导得出 Derived from ②③④	232	232.30
⑦堆芯出口温度 Core outlet temperature/℃	由②③④推导得出 Derived from ②③④	278	278.04
⑧堆芯高度 Core height/m	初始假设 Initial assumption	14	14
⑨驱动压头 Driving head /kPa	由②⑥⑦⑧推导得出，与阻力比较 Derived from ②⑥⑦⑧, compared with drag force	9.97	9.91



(a) 堆芯压力和质量流量达到稳态的过程

(a) Core pressure and mass flow reaching steady state



(b) 堆芯进出口温度达到稳态的过程

(b) Inlet and outlet temperature reaching steady state

图 1　主要参数变化曲线图

Fig.1　Main Parameters' Curves

7　结论

本文聚焦于小型压水堆的总体方案及主参数设计。小型压水堆的主参数包括了堆芯参数、主回路参数和蒸汽参数，主回路可以采用自然循环和强迫循环两种循环方式，对于不同的循环方式，主回路总体布置方案和主参数取值方式也有所不同。本文对小型压水堆的堆芯燃料组件排列方式、主回路流能比的取值及二回路蒸汽参数的取值给出了建议，展示并验证了自然循环小型堆主回路参数的设计过程。目前绝大多数小型化压水堆还处于概念研发阶段，本文可为新型小型堆的研发设计提供思路与建议。

参考文献

[1]　陈文军,姜胜耀.中国发展小型堆核能系统的可行性研究[J].核动力工程,2013,34(2):153-156.

[2]　IAEA-TECDOC-1485 Status of Innovative Small and Medium Sized Reactor Designs, Vienna:International Atomic Energy Agency,2005.

[3]　李东朋,朱庆福,夏兆东.330MW 环形燃料小型堆方案设计[J].原子能科学技术,2020,54(10): 1866-1872.

[4] 刘宇生, 吴鹏, 刘希瑞, 等. 浮动小型堆堆芯热工水力验证能力分析[J]. Nuclear Safety, 2020, 19(5).
[5] 郝承明, 付文, 彭敏俊, 等. 一体化反应堆强迫循环转自然循环过程瞬态特性分析[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(2): 243-248.
[6] 刘晓壮.国内外部分小型压水堆安全特性比较分析[J].核安全,2015,14(1):56-59.